

디젤 엔진용 Articulated Piston 단조 공정 설계

염성호*·이병섭**·서기석**·노병래***·홍성인****

Forging Process Design of Articulated Piston for Diesel Engine

S.H. Yeom, B.S. Lee, K.S. Shu, B.R. Rho and S.I. Hong

Abstract

The articulated piston that was used to more powerful diesel engine was composed by Al casted skirt part and steel forged crown part. this paper has the target to design the forging process of crown part. The parameters of piston design and forging process design were gotten based on work experience, experimental data, approximately calculated data and finite element analysis. Preform design parameter decided using the Taguchi method. Through this research, could design optimal shape of preform and produce prototype of the articulated piston

Key Words : Diesel Engine, Articulated Piston, Forging Process Design, Preform

1. 서론

우리나라의 기반 산업으로 자리 잡은 자동차 산업의 한축인 디젤자동차는 선진국을 중심으로 이제 보다 친환경적이고 고성능과 고효율을 가질 것이 요구되고 있다. 그러나, 현재 국내에서 제작 기술을 확보하고 있는 알루미늄 소재 피스톤의 디젤엔진은 점점 출력향상에 따라 기계적 및 열부하가 증가됨으로써 피스톤 핀 보스의 파손, 피스톤 링 및 스커트의 마모 등과 같은 문제가 발생하여 새로운 요구를 만족시키지 못하고 있다. 이에 대한 해결책으로 선진 외국에서는 이미 제안되어 사용하고, 수입하고 있는 접합피스톤(*articulated piston*)에 관련된 기술 확보가 필요하다. 접합피스톤은 크라운 부와 스커트 부분이 독립적으로 제작된 후 이를 결합하는 방식으

로 80년대 후반에 주철 크라운부, 알루미늄 스커트 조합이 소개된 후, 단조강 크라운 부를 채택 백만 마일 이상의 강도와 내구성을 갖도록 발전하였다. 그럼에도 불구하고 크라운 부의 두께 증가로 인해 무거운 점이나 피스톤 핀 길이가 길고 일차 단조 가공 후 2차로 크라운과 스커트 각각에 대하여 추가적 기계가공을 함으로써 발생하는 비용 문제, 최적 연소실을 위한 크라운 부의 적정 형상, 복잡한 형상을 갖는 크라운 부의 단조 방법 등 해결할 것이 많다. 그중 본 연구팀은 크라운부를 제작하는 최적 단조 공정을 개발하는데 목적을 두고 협력 업체 및 기관의 경험과 기존 설계 이론식과 다구찌 방법을 응용한 예비성형체 설계와 유한요소법등을 사용연구를 진행하였다. 그 결과 개발된 접합피스톤과 제작 기술은 차세대 디젤 엔진 개발을 위한 기반 기술로 적용될 것이다.

* 충남대학교 대학원 기계공학과
** 한국원자력연구소
*** 국방과학연구소
**** 충남대학교 기계공학과

2. 단조 조건의 결정

본 연구는 미래형자동차기술개발 사업의 일환으로 최고 연소압력 18MPa 이상을 견딜수 있는 재료강도 확보하고 디젤엔진 3.0L급을 목표로 하고 있으며, 현재 수입에 의존하고 있는 접합피스톤의 국내개발, 국산화의 조속한 달성하기 위하여 Fig. 1과 같은 개발내용 및 개발 범위에 따라 연구를 진행하였다.

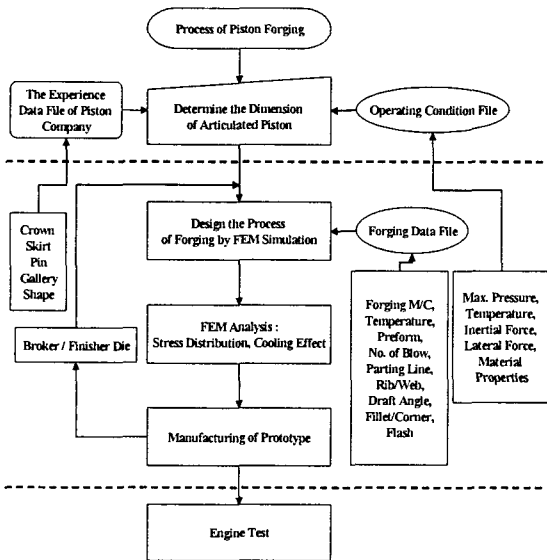


Fig. 1 Flowchart of forging process for articulated piston

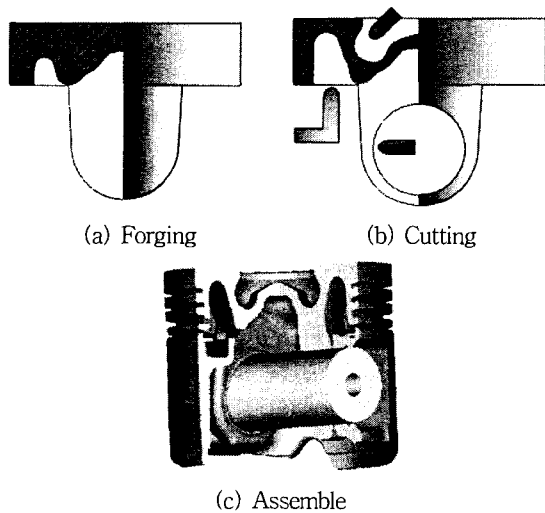


Fig. 2 Manufacturing Process of articulated piston

Fig. 2는 우선 단조를 한후 연소실과 쿨링갤러리

(cooling gallery), 피스톤 핀 구멍을 위한 절삭, 마지막으로 크라운부와 스커트부의 결합으로 이어지는 접합피스톤의 제작 공정을 보여 주고 있다. Fig. 2(a)에서 보여지는 단조과정은 우선, 절삭에 의한 비용 절감을 위해서 적정 강도와 형상을 가질것이 요구된다. 이를 위한 적정 강도를 만족하기 위하여 국내에 기 개발된 인장강도 100 kg/mm²의 열처리된 크롬몰리브덴강 SCM440을 사용하였다. 또한 피스톤 단조품의 형상이 쿨링갤러리, 피스톤 핀부의 고려등으로 인해 깊이가 깊기 때문에 성형성을 향상 시키기 위해서 열간 공정을 선택하였으며, 열간 가공의 경우 소재 온도가 내려가면 변형 저항이 증가하고 피스톤 단조의 경우 성형과정에서 주 변형 방향을 일방향으로 한정할 수 있기 때문에 이에 상대적으로 유리한 고속햄머를 단조기계로 선정하였다. Table 1은 사용가능한 엔빌 타입의 고속 햄머의 특성값을 보여 주고 있다. 그중 성형에너지의 계산과 유한요소 상용프로그램인 DEFORM-3D⁽¹⁾을 이용한 확인 작업을 통하여 개방형 파워 드랍 해머 250ton을 선정하였다. 고속햄머에 의한 단조 성형 경우 성형이 끝나는 시점에서 단조품의 온도가 A3 변태점보다 조금 높도록 설정하므로, SCM440을 고려하여 1200℃로 결정하였다.

Table 1 Characteristic values of anvil type hammer

Hammer type (E [kN-m])		nB	Vs[m/s]
Free Drop	Belt	40	0.3-0.6
	Board	16	0.3-0.6
	Chain	100	0.3-0.6
	Piston	63	0.3-0.6
Power Drop	Pneumatic	50	0.8-0.9
	Open-die, single frame	40	0.8-0.9
	Open-die, double frame	250	0.8-0.9
Die Forging	100	0.3-0.6	5-8

3. 단조 공정 설계

파워 드랍 해머를 이용한 단조의 경우 일반적으로 업셋팅(upsetting), 블로커(blocker), 피니셔(finisher) 공정을 갖게 된다. 이 중 최종 단조품의 형상과 치수를 결정하는 피니셔 공정에서 사용하는 금형과 예비성형체의 설계에 있어 잘못 될 경우 과도한 단조하중, 금형 마모, 금형 파손, 미충진(undertill), 유동 결함등의 문제가 발생되고, 이에 따른 경제적 손실을 초래하게 된다. 그렇기 때문에 피스톤 크라운부 피니셔 설계를 위하여 협력업체인 계명산업과 실무자의 경험과 문헌의 자료를 고찰 분석하여 Fig. 3에 나타내어진 필요한 변수들을 결정하였으며,

유한요소해석을 통하여 예비성형체를 결정하였다.

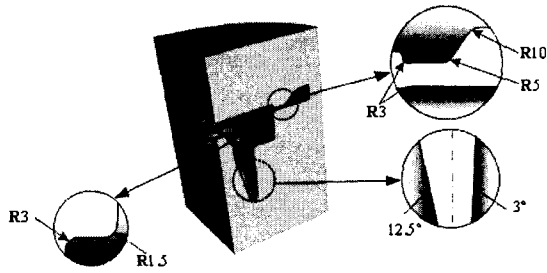


Fig. 3 Draft angle, corner radius and flash geometry of finisher die

3.1 최소 리브 두께와 최소 웨브 두께

최소 리브의 두께는 리브 높이에 의해 결정되며, 보통 높이 대 두께의 비가 최대 6:1을 넘지 않는 범위 내에서 설계하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 이에 본 개발품에서는 최종 단조품 형상에 근거하여 높이 46.2 mm, 두께 17.5 mm로 높이 대 두께의 비가 4:1로 허용 범위 내에 있도록 설계하였다. 소재의 다른 부분들을 이어 주는 역할과 금형 공동부에서 소재 유동 통로 역할을 하는 웨브는 금형 분리선의 위치, 드래프트 각, 코너 및 필렛 반경, 리브의 치수, 상단 랜드부와 피스톤 링 벨트부 등을 고려하여 30.1 mm로 결정하였다.

3.2 드래프트 각 (draft angle)

제품을 금형으로부터 쉽게 추출하기 위하여 필요한 드래프트 각은 과도할 경우 금형의 가공비용과 재료손실을 증가시키므로 단조품의 수축 방향과 단조 기계의 특성을 살려 적절한 드래프트 각의 결정이 이루어져야 한다. 파워 해머 열간 단조의 경우 단조품이 냉각함에 따라 반경 및 길이 방향으로 수축에 따라 안쪽의 드래프트 각이 바깥쪽 드래프트 각보다 상대적으로 크고, 단조품의 깊이가 깊기 때문에 안쪽 12.5°, 바깥쪽 3°로 결정하였다.

3.3 코너 반경과 필렛 반경

코너 및 필렛부에 반경을 두는 것은 금형 공동부 내에서 금속의 유동을 용이하게 할 뿐만 아니라, 금형의 마모 및 파손을 줄이기 위해서 필요하다. 코너 반경과 필렛 반경이 크면 마찰부위에서 상대적으로 응력이 낮아지고 금형 수명이 길어지며, 너무 작으면 금속 유동이 원활하지 않아 미 충전이 발생하거나, 응력 집중에 의하여 금형 마모가 촉진되며 균열이 발생할 수 있다. 그러나, 최종 제품의 치수에 의해 반경을 크게 하는 데는 제한 사항이 다르므로, 최종 제품의 치수에 한정된 반경을 채

택하였다.

3.4 플래쉬 (flash)

일반적으로 플래쉬의 두께는 단조품 최대 두께의 약 3%, 랜드부의 길이 대 플래쉬 두께는 3:1 정도로 알려져 있고, 많은 계산식 또한 제안되어 있다. 그 중 본 연구에서는 열간 단조에 적절하고, 예비성형체의 직경과 높이만으로 계산이 가능한 Vieregge의 다음 식을 선택하여 결정⁽³⁾하였다.

$$s = 0.017d_0 + \frac{1}{\sqrt{d_0 + 5}} \quad (1)$$

$$b = \frac{30s}{\sqrt{1 + \frac{2d_0}{h}}} \quad (2)$$

여기서, s는 플래쉬 두께, b는 플래쉬의 폭, d_0 는 예비성형체의 외경, h는 예비성형체의 높이이다. 이다. 본 개발품에서 결정된 치수는 $s=3\text{mm}$, $b=6.2\text{mm}$, $d_0=81\text{mm}$, $h=60\text{mm}$ 이다.

3.5 예비성형체의 결정

파워 해머의 피니셔 공정에서 예비성형체가 정확하지 않으면 단조시 과다 하중이 발생하고 미충진 및 겹침(lap) 결함이 발생할 수 있다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 개발품의 햄머 공정을 DEFORM-3D를 이용하여 해석하였다. 또한 해석 패키지에서 제공하는 연성파괴기준을 이용 다구찌 해석을 실시하여 최적의 예비성형체를 결정하였다.

3.5.1 유한요소 해석

Table 2 Conditions for DEFORM analysis

Control Parameters				
Blow efficiency		0.8		
Hammer mass (kg)		750(1/4 model)		
Billet Temp. (°C)		1200		
Hammer Energy (MN-mm)				
Billet Dia. (mm)	First blow	Second blow	Third blow	Fourth blow
80	1.50	3.75	5.25	7.25
Material Properties				
Billet		SCM440 (20°C~1200°C)		
Upper & Bottom Die		Rigid		
Inter-Object				
Billet-Die Shear Friction Coeff.		0.7		

피스톤 단조품의 해석 모델은 앞서 언급한 Fig. 3에서 일 수 있듯이 전체 형상의 1/4 단면으로 결정하고 타격 공정은 현장 경험자의 의견에 따라 4공정을 선택하였다. 사용한 초기 요소 수는 사면체(tetra) 요소 15785개, 절점(node) 수 3770개이고, 기타 해석에 사용된 타격효율, 햄머 중량, 빌렛 온도, 마찰계수, 각 타격단계의 에너지 값은 Table 2에 정리하였다.

3.5.2 해석 결과 및 분석

DEFORM-3D을 이용한 최적 예비성형체를 결정하기 위해서 Fig. 4와 같이 쿨링 갤러리 부의 깊이 d_g 와 핀 보스부의 깊이 d_b 을 설계 변수로 선택하여 Table 3에서와 같이 잡음 인자를 소재 충만성으로 결정⁽⁴⁾하였다. 이에 대하여 각각의 해석을 수행하고 DEFORM-3D에서 제공하는 연성파괴기준을 출력하고 이를 다구찌 방법의 S/N비로 변화하였다. Table 4에 표시된 결과를 살펴보면 핀 보스의 깊이 보다 갤러리 부의 영향이 보다 큰 것으로 나타났으며, 갤러리 깊이 7mm, 핀 보스 깊이 20mm에서 최적값을 가짐을 알 수 있었다. 그러나, 실제 해석 과정 상 요소의 수에 의해 출력되는 연성파괴기준의 변화가 심하고, 다구찌 방법의 최적화에 대한 기본적 오류에 대한 수정⁽⁵⁾이 필요하므로, 추가적 연구가 필요할 것이다.

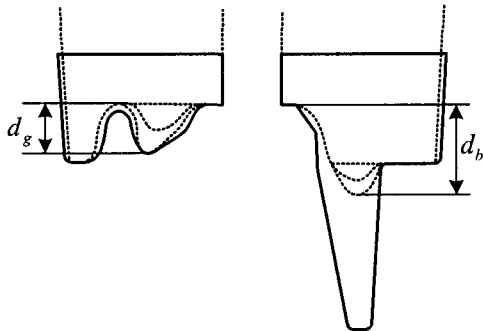


Fig. 4 Design parameters of piston forging

Table 3 Levels of design parameters and noise factors

Design parameters	Parameters	Depth gallery d_g [mm]	Depth pin-boss d_b [mm]
	Levels		
	1	0	16
	2	7	20
	3	14	24
Noise factors	Factors	Die filling [98%]	
	Levels		
	1	-0.5 %	
	2	0 %	
	3	0.5 %	

Table 4 S/N ratios for ductile fracture value

No.	d_g	d_b	Die filling			S/N
			1	2	3	
1	1	1	0.5344	0.5424	0.5403	-1.09417
2	1	2	0.5007	0.4831	0.4744	-0.1978
3	1	3	0.8135	0.5233	0.5210	-2.50778
4	2	1	0.3450	0.3786	0.3674	2.317841
5	2	2	0.5090	0.6362	0.5921	-1.75263
6	2	3	0.4835	0.4940	0.5096	-0.3681
7	3	1	0.5090	0.5088	0.5121	-0.61256
8	3	2	0.3207	0.3632	0.3628	2.670131
9	3	3	0.3404	0.3534	0.4837	1.545065

4. 결론

단조강 접합 피스톤의 단조 공정 개발 내용의 결론을 요약하면 다음과 같다

- (1) 접합 피스톤에 적절한 단조기계, 성형온도, 성형단계 및 금형 설계의 주요 변수를 결정하였다.
- (2) 예비성형체의 유한요소 시뮬레이션의 결과 및 분석을 통하여 예비성형체를 설계하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 미래형 자동차 기술 개발 과제 of 일환으로 (주)동서공업의 위탁 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) Deform 3D Version 4.0 User's Manual
- (2) 김대영, 박종진, 1998, "축대칭 열간 강단조의 피니셔 설계 시스템 개발", 한국소성가공학회지, Vol. 7, No. 3, p. 291-297
- (3) Lange. K, 1985, "Hand book of metal forming", McGraw-Hill
- (4) 김동환, 김동진, 고대철, 김병민, 최재찬, 1998, "가공성을 고려한 다단계 금속성형공정의 예비성형체 설계방법:다구찌 방법을 이용한 신경망의 적용", 대한기계학회논문집 A권, Vol. 22, No. 9, p. 1615-1624
- (5) 정은영, 김지현, 1996, "다구찌의 SN비와 BOX의 변수변환방법", 한국통계학회논문집, Vol. 3, No. 2, p. 85-91